

УДК

Е.Н. ГНЕЗДОВ, Н.Е. ГНЕЗДОВ, Ю.И. МАРЧЕНКО, Е.А. ПЕРЕЖИГИН,  
М.В. ЛОПАТИНА, М.С. ЦВЕТКОВА (добавить регалии и места работы!!! – за мной)

## Технологический энергоаудит туннельной печи для обжига керамических изделий

Исследованиям процессов сушки и обжига керамических изделий посвящены многие работы [1–7]. Как правило, отдельно рассматриваются особенности технологии и энергоэкономические показатели работы оборудования.

Реальный процесс представляет собой единое целое, поэтому, на наш взгляд, целесообразно объединить эти два направления и проводить так называемый технологический энергоаудит. Технологические особенности процесса при таком рассмотрении будут являться основой для определения оптимальных энергетических и технико-экономических показателей.

Сушильные и печные агрегаты грубокерамического производства работают в течение многих лет и даже десятилетий. При этом, с одной стороны, происходит естественное старение оборудования, а с другой стороны, появляются новые технические решения, внедряемые в процесс сушки и обжига наряду с изменяющимися внешними условиями и требованиями. Все это приводит к существенному изменению технико-экономических показателей работы установок. Поэтому необходимо периодически проводить теплотехнологические обследования агрегатов с целью поиска наилучших параметров работы установок. При этом необходимо сравнивать полученные результаты: а) с проектными, б) с показателями для аналогичных установок, в) с характеристиками наилучших в отрасли установок.

Существуют эффективные методики адаптационной оптимизации работы теплотехнологических установок, например симплекс-метод. Но и для него единственным надежным методом получения реальных показателей работы технологических установок являются промышленные испытания.

Авторами выполнены работы по обследованию туннельной печи линии «В» ЗАО «Норский керамический завод» (г. Ярославль). Целью теплотехнологического обследования печи было измерение основных параметров ее работы и составление теплового баланса.

Печь имеет размеры  $157,4 \times 4,6 \times 1,8$  м и разделена по длине на три технологические зоны: нагрева, обжига и охлаждения. Внутри печи по рельсовым путям проталкиваются вагонетки с восемью пакетами керамических изделий. Печь работает по принципу противотока, то

есть продукты горения и воздух движутся навстречу вагонеткам. Движение продуктов горения и воздушных потоков обеспечивается системой вентиляторов. В настоящее время одним из основных обжигаемых изделий является лицевой кирпич пустотностью до 40% и размерами  $250 \times 120 \times 88$  мм.

Системой автоматического управления по рельсовому пути в туннельной печи очередная вагонетка с керамическими изделиями передвигается на 1/2 ее длины вместе с другими. Вагонетка представляет собой металлическую тележку с теплоизоляцией и огнеупорной обмуровкой сверху, на которой находится садка обжигаемых изделий.

Сначала вагонетка попадает в форкамеру длиной 3 м, оборудованную двумя шторными воротами. Форкамера служит для уменьшения газообмена с окружающей средой при загрузке вагонеток в печь. Из форкамеры вагонетка с кирпичом проталкивается в зону подогрева длиной 61,6 м на 22 позиции. Основное назначение зоны подогрева – окончательное удаление влаги из сырца и равномерный прогрев садки. В этой зоне установлено три пары осевых вентиляторов рециркуляции, которые должны обеспечивать равномерный прогрев пакетов изделий по высоте. В настоящее время вентиляторы не работают. В зоне подогрева дополнительно установлены 10 боковых горелок в шахматном порядке по 5 горелок с каждой стороны.

Прогретые изделия поступают в зону обжига длиной 28 м на 10 позиций, где при температуре  $1030^\circ\text{C}$  происходит химико-физический процесс спекания. В зоне обжига для сжигания топлива установлено 9 групп горелочных устройств типа «Вулкан-Т» с горелками принудительного смешения. Горение топлива происходит в разрывах между садками изделий на вагонетках. Вентиляторы для подачи воздуха на сводовые горелки установлены отдельно для каждой зоны регулирования (позиции). Они забирают горячий воздух из межсводового пространства с подмешиванием воздуха из цеха.

В зоне охлаждения длиной 64,4 м на 23 позициях происходит остывание изделий. Охлаждаются обожженные изделия холодным воздухом, который подается тремя осевыми вентиляторами, установленными на воротах на выходе из печи. Отбор горячего воздуха из зоны охлаждения печи осуществляется вентилятором подачи горячего воздуха на сушку кирпича-сырца.

Для охлаждения металлоконструкций печных вагонеток по проекту служит осевой вентилятор, который установлен в подподовом канале печи. В настоящее время он отключен, а для подачи охлаждающего низ вагонеток воздуха служит дополнительное отверстие диаметром  $\sim 1,1$  м в конце нижнего строения печи. Движение поступающего на охлаждение вагонеток воздуха обеспечивается за счет разрежения, создаваемого дымососом, а количество воздуха регулируется открытием дверей в перегородках подподового канала.

Регулировка аэродинамического режима работы печи и удаление дымовых газов в атмосферу производится дымососом.



Рис. 1. Схема деления наружной поверхности печи на участки. Номера участков: 1, 2, 3 – боковые левые; 7, 8, 9 – боковые правые; 4, 5, 6 – сводовые; 10, 11, 12 – подовые; 13, 14 – торцевые

Таблица 1

Потери тепла наружными поверхностями печи

Номера участков	F, м <sup>2</sup>	t <sub>ср</sub> , °С	t <sub>окр.ср</sub> , °С	Δt = t <sub>ср</sub> - t <sub>окр.ср</sub> , °С	α, Вт/м <sup>2</sup> ·°С	Q, кВт
1	170,28	35,6	23,87	11,73	10,507	20,99
2	238,73	41,93	31,87	10,06	10,739	25,79
3	204,62	31,9	24,83	7,06	9,857	14,26
4	283,51	55,46	32	23,46	13,792	91,73
5	397,49	61,44	34	27,44	14,335	156,35
6	340,7	63,44	32,6	30,84	14,581	153,2
7	170,28	34,78	23,33	11,45	10,44	20,35
8	238,73	48,2	25,75	22,63	11,785	63,13
9	204,62	40,2	19,1	21,1	11,268	48,65
10	283,51	71,95	58,66	13,29	7,95*	29,95
11	397,49	121,2	56,23	64,97	9,79*	252,83
12	340,7	139,88	54,69	85,19	10,56*	306,5
13	27,69	25,37	20,5	4,87	9,181	1,24
13	20,16	27,6	20,5	7,1	10,766	1,54
14	24,98	25,87	22	3,87	9,019	0,87
14	15,12	30,1	22	8,1	11,056	1,35
Итого	3358,61					1188,63

\* только лучистая составляющая теплового потока.

Ознакомление с проектными материалами по печи показало, что в целом конструкция и режим работы печи соответствуют проекту. Ремонты печи и отдельного оборудования ведутся в соответствии с графиком планово-предупредительных ремонтов. Отмечено, что в связи с недостаточным обжигом нижних рядов кирпичей на вагонетках установлен канализированный под для пакетов кирпичей. Созданные таким образом каналы для прохода теплоносителя под пакетами улучшают прогрев нижних рядов изделий.

Обслуживающий персонал печи регулярно контролирует соответствие реальных параметров работы печи заданным по режимной карте. Результаты контроля записываются оператором в сменные журналы на рабочем месте. Уровень подготовки обслуживающего персонала достаточно высокий.

Печь работает в стационарном режиме, предварительное обследование не выявило существенных нарушений теплотехнологии, есть незначительные отклонения, среди которых можно отметить следующие.

1. В отличие от первоначального проекта изменена система охлаждения подвагонеточного пространства, но принцип охлаждения большим количеством воздуха, движущегося с низкой скоростью, остался прежний. Такой принцип охлаждения не является наиболее эффективным.

2. Не работают вентиляторы рециркуляции продуктов сгорания в зоне подогрева кирпича. Они должны были выполнять двойную роль: во-первых, увеличивать скорость движения продуктов сгорания около кирпича в рабочем пространстве печи и, следовательно, повышать теплоперенос от газов к изделиям, во-вторых, обеспечивать перемешивание газовой среды в печи и усреднение температуры продуктов сгорания как по высоте, так и по ширине рабочего пространства. Кроме того, возврат тепла (уходящих газов) в технологический процесс в том же агрегате считается, как правило, наиболее рациональным способом использования вторичных энергетических ресурсов. Но конструктивно система рециркуляции не выполняла возложенных на нее функций.

3. Вновь установленные боковые горелки перед зоной обжига являются эффективным средством для ра-

Таблица 2  
Сводная таблица теплового баланса печи

Статьи теплового баланса	Количество тепла	
	кВт	%
Приходные статьи		
Теплота горения топлива	6551,5	90
Теплота горения опилок	–	–
Тепло топлива физическое	2,8	–
Тепло загружаемых изделий	94,1	1,3
Тепло, вносимое вагонетками	65	0,9
Тепло воздуха, поступающего в печь	567,5	7,8
Итого:	7280,9	100
Расходные статьи		
Теплота выходящих из печи изделий	266,4	3,7
Расход тепла на разложение известняка	1849,6	25,4
Расход тепла на испарение и нагрев влаги	49,4	0,7
Потери тепла с выходящими вагонетками	250	3,4
Потери тепла наружными поверхностями печи	1245,3	17,1
Потери тепла с уходящими газами	2730,3	37,5
Расход тепла с горячим воздухом (на сушило)	719,9	9,9
Неучтенные потери	170	2,3
Итого:	7280,9	100

зогрева садки изделий перед обжигом и обеспечения необходимого технологического режима. Это изменение проекта позволило обеспечить более равномерный предварительный подогрев садки изделий.

4. Есть неплотности стыков вагонеток из-за нарушения уплотнительного шнура между вагонетками.

5. Футеровка вагонеток частично разрушена, причем отклонения краев футеровки по вертикали и горизонтально достигают ~50 мм. Это ухудшает работу лабиринтового уплотнения между рабочим пространством и контрольным каналом и способствует подосу холодного воздуха в печь, что приводит к перерасходу топлива.

Тепловой баланс туннельной печи рассчитывался по результатам испытаний. Печь работает на природном газе в стационарном режиме. Статьи теплового баланса измеряются в кВт. Для данной печи уравнение тепловой баланса имеет вид:

$$Q_{\text{ТЛ}} + Q_{\text{оп}} + Q_{\text{ф}} + Q'_{\text{к}} + Q'_{\text{в}} + Q_{\text{вз}} = Q''_{\text{к}} + Q_{\text{изв}} + Q_{\text{исп}} + Q'_{\text{в}} + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{ух}} + Q_{\text{вг}} + Q_{\text{неучт}},$$

где приходные статьи:  $Q_{\text{ТЛ}}$ ,  $Q_{\text{оп}}$ ,  $Q_{\text{ф}}$ ,  $Q'_{\text{к}}$ ,  $Q'_{\text{в}}$ ,  $Q_{\text{вз}}$  – соответственно теплота горения топлива и горения опилок, тепло топлива физическое, тепло загружаемых изделий, тепло, вносимое вагонетками и тепло воздуха, идущего на горение; расходные статьи:  $Q''_{\text{к}}$ ,  $Q_{\text{изв}}$ ,  $Q_{\text{исп}}$ ,  $Q'_{\text{в}}$ ,  $Q_{\text{пов}}$ ,  $Q_{\text{ух}}$ ,  $Q_{\text{вг}}$  – соответственно потери тепла с керамическими изделиями, расход тепла на разложение карбонатов, расход тепла на испарение и нагрев влаги, потери тепла с выходящими вагонетками, потери тепла наружными поверхностями печи, потери тепла с уходящими газами, выход тепла с горячим воздухом, направляемым на сушило.

При измерении параметров работы печи использовались современные приборы с внутренней памятью и выходом на ПК, в том числе газоанализатор ДАГ-500, многоканальный регистратор «Терем-4», автономный миниатюрный регистратор температуры ТЛ-01, инфракрасный пирометр излучения С-300, тепловизор IRISYS 1011.

Для определения теплопотерь в окружающую среду наружную поверхность печи условно разделили на 14 участков (рис. 1). Измеренная инфракрасным пирометром излучения С-300 температура на поверхностях

отмечалась на подробной схеме поверхностей кладки, где также указаны номера позиций.

Потери тепла по участкам определялись по формуле [8]:

$$Q_{\text{пот}} = \alpha_i \cdot F_i \cdot (t_{\text{ср}i} - t_{\text{окр}i}), \text{ кВт},$$

где  $\alpha_i$  — коэффициент конвективной теплоотдачи от  $i$ -го участка наружной поверхности печи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), который рассчитывался по зависимости, учитывающей конвективную и лучистую составляющие теплового потока;  $F_i$  — площадь поверхности  $i$ -го участка, м<sup>2</sup>.

$$\alpha_i = k \cdot \sqrt[4]{t_{\text{ср}i} - t_{\text{окр}i}} + \frac{5,7 \cdot \varepsilon \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{ср}i}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{окр}i}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{ср}i} - t_{\text{окр}i}},$$

где  $k = 2,6$  — для вертикальных стенок;  $k = 3,3$  — для горизонтальных поверхностей при теплоотдаче вверх (свод);  $k = 1,6$  — для горизонтальных поверхностей при теплоотдаче вниз (под);  $\varepsilon$  — степень черноты: для кирпичных стенок принималось  $\varepsilon = 0,9$ ;  $t_{\text{ср}i}$  — средняя температура наружной поверхности печи на  $i$ -ом участке.

При измерениях и обработке полученных результатов учитывали температуру в цехе на каждом из участков в отдельности.

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Данные табл. 1 показывают, что наибольшие потери тепла происходят через свод (участки 5 и 6) и под печи (участки 11 и 12), которые охлаждаются воздухом.

Расход продуктов сгорания на выходе из дымососа определялся по результатам измерений скоростного перепада давления за дымососом с помощью трубки ВТИ и наклонного микроанометра ММН-240, а также комплекта приборов ДМЦ-01М.

По графикам для коэффициента расхода воздуха сверху, снизу и в среднем по печному каналу (рис. 2) видно, что в зоне сводовых и боковых горелок он держится на уровне от 1,5 до 3 и только в сечении 7 (позиция 9) значительно выше, что свидетельствует о неплотности в этом месте. Поскольку коэффициент расхода воздуха существенно повышается только на выходе продуктов сгорания из печи (от ~3,5 на поз. 3 до ~7 на выходе из дымососа), то вероятно большое количество воздуха проходит вдоль всего контрольного канала под вагонетками (и это физически воспринимается как ветер) и уходит затем в дымопады в стенках печи и в дымосос. Из этого следует вывод, что перегородки под вагонетками как в начале, так и в конце печи будут эффективным средством для снижения подсосов воздуха в печь и уменьшения расхода природного газа на горелки и расхода электроэнергии на привод дымососа.

Результаты расчета теплового баланса печи приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Результаты теплотехнологического обследования печи показали, что удельный расход условного топлива на обжиг керамических изделий составляет 230 кг усл. топлива на 1000 шт. кирпича. На рис. 3 дана схема Санкея теплового баланса печи линии «В», где для сравнения в скобках приведены числа по печи линии «С». Производительность печи линии «В» по обожженным изделиям в испытаниях составила 7486 кг/ч. По рисунку видно, что в приходной части 90% (80,5%) тепла получается при горении природного газа. В расходных статьях теплового баланса теплота выходящих из печи изделий составляет величину 3,7% (6,7%), расход тепла с горячим воздухом 9,9% (25,8%), потери тепла с уходящими газами 37,5% (34,6%), теплопотери через кладку печи 17,1% (19,2%).

Структура теплового баланса печи линии «В» в целом аналогична определенной ранее экспериментально для печи линии «С» (рис. 3), которая имеет другие технические характеристики.

Основных отличий три:

1) существенно больше тратится тепла на разложение известняка (25,4% против 9,9%), что объясняется повышенным содержанием его в шихте;

2) меньшее количество тепла (9,9% по сравнению с 25,8%) отбирается от печи с горячим воздухом для сушки керамических изделий;

3) в приходной части теплового баланса отсутствует теплота горения опилок, которая в печи линии «С» достигла 10,4%.

По-прежнему основная доля тепла в приходе — химическая энергия сжигания природного газа 90% (80,5%). В скобках даются числа для печи линии «С».

В расходных статьях теплового баланса теплота выходящих из печи изделий составляет величину ~3,7% (6,7%), расход тепла с охлаждающим воздухом ~9,9% (25,8%), потери тепла с уходящими газами ~37,5% (34,6%), теплопотери через кладку печи ~17,1% (19,2%).

Анализ результатов тепловизионного обследования стен и свода печи позволил:

а) выявить места с аномально повышенной температурой (невидимые снаружи разрушения внутренних слоев кладки) — такие места есть и они хорошо идентифицируются на фотографиях температурных полей кладки;

б) количественно оценить уровень аномальных температурных полей и увидеть их в сравнении с обычными фотографическими снимками.

Велика в тепловом балансе печи доля тепла, теряемого с уходящими газами: 37,5% (34,6%), хотя температура уходящих газов достаточно низкая (120–140°С). Последнее обстоятельство сильно затрудняет утилизацию теплоты газов, содержащих водяные пары, а так же оксиды серы, углерода, азота.

Особенностью туннельных печей для обжига кирпича является большое разбавление уходящих газов подсосываемым воздухом. Коэффициент расхода воздуха по результатам газового анализа на выходе из печи за дымососом  $\alpha_{\text{вз}}$  изменялся в наших экспериментах от 6,3 до 9 (проекомт предусмотрен коэффициент  $\alpha_{\text{вз}}=7$ ), тогда как для горения достаточно иметь величину порядка  $\alpha_{\text{вз}}=1,15$ . Интересно, что в зоне обжига анализы продуктов горения дают сравнительно небольшие значения  $\alpha_{\text{вз}}$  от 1,5 до 2,3. Это позволяет предположить, что при снижении подсоса холодного воздуха по пути движения продуктов сго-

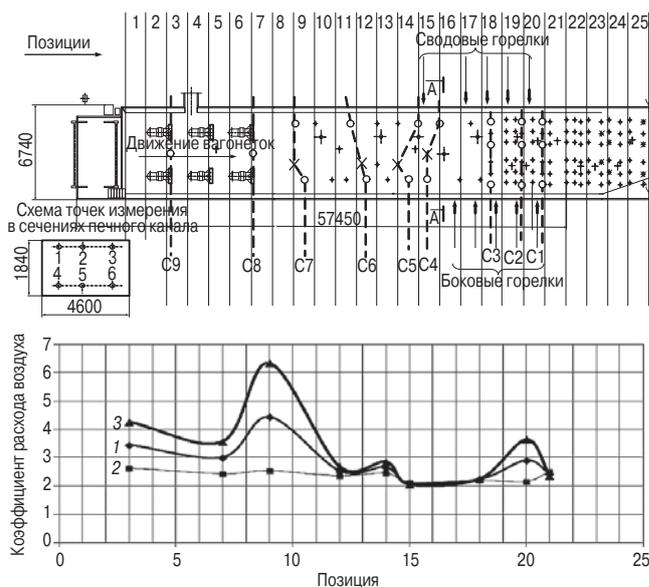


Рис. 2. Схема и результаты измерения коэффициента расхода воздуха по объему печи. С1–С9 — сечения, в которых проводились измерения. Коэффициент расхода воздуха: 1 — средний по сечению; 2 — в верхних точках; 3 — в нижних точках

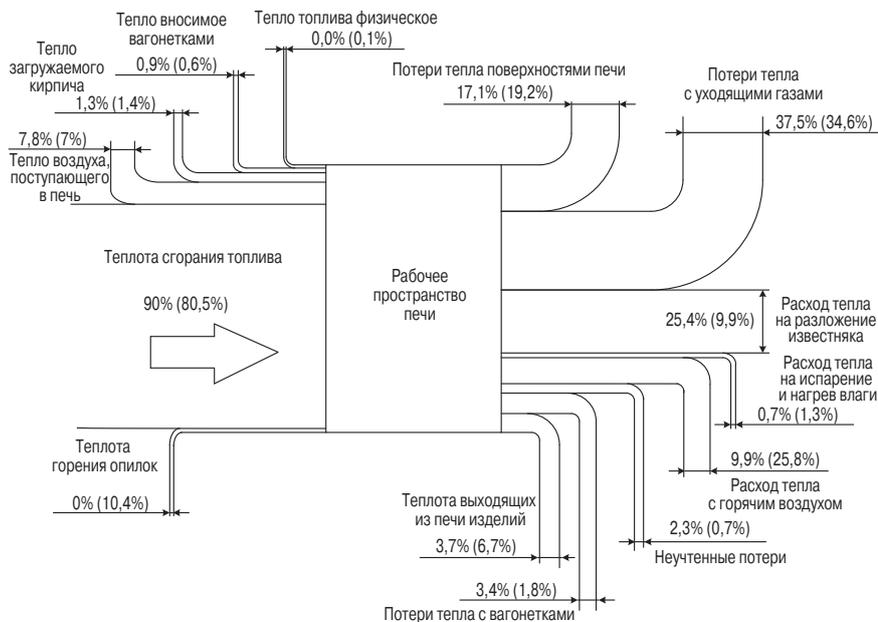


Рис. 3. Схема Санкея теплового баланса печи линии «В» («С»)

рания в зоне подогрева керамических изделий можно достичь экономии топлива до 30%. Такое направление экономии топлива следует считать основным.

Для его реализации необходимо:

1) уменьшить поступление воздуха в зоны обжига и подогрева печи путем:

- организации дозированной подачи воздуха в подвагонеточное пространство;
- уплотнения подвагонеточного пространства со стороны выхода вагонеток из печи;
- установки перегородок в контрольном канале;
- регулярного осмотра и ремонта имеющихся элементов герметизации рабочего пространства печи;

2) использовать тепло уходящих газов наиболее эффективным методом (технологический вариант) за счет интенсификации теплоотдачи от горячих уходящих газов к подогреваемому изделию. Этого можно добиться увеличением скорости движения продуктов сгорания около садки изделий, что призваны были обеспечивать рециркуляционные вентиляторы.

Вторым по значению реальным направлением экономии топлива является уменьшение теплотерь через ограждения рабочего пространства печи, которые стабильно велики – 17,1% (19,2%) по сравнению, например, с котельными установками (менее 5%).

Температура садки изделий на выходе из печи достаточно высока (при измерениях ~128°C. Доля тепла выходящих из печи изделий ~3,7% (6,7%) может быть уменьшена ~ в 1,5–2 раза. С другой стороны, можно увеличить количество теплоты, отбираемое у горячих керамических изделий охлаждающим воздухом. Доля теплоты горячего (~330°C) воздуха составляет в настоящее время только ~9,9% (25,8%) от общего расхода тепла. Процесс охлаждения садки керамических изделий проходит вяло.

Необходимо и возможно организовать равномерно рассредоточенное охлаждение межсводового пространства (освободить и прочистить каналы для поступления воздуха из цеха в боковых стенках печи) над зоной охлаждения садки изделий, а также и над другими зонами печи, и обеспечить постоянную работу отвода (отсоса) теплого воздуха в общий воздуховод горячего воздуха на сушку (в воздуховод прямой рекуперации).

Система охлаждения нижних элементов конструкции вагонеток была изменена по сравнению с проектом.

Вместо подачи воздуха в контрольный канал вентилятором в начале зоны обжига перешли к подводу воздуха из цеха за счет самотяги через отдельное отверстие ~0,1 м в конце зоны охлаждения. При этом не предусмотрена возможность регулирования подачи воздуха как по количеству, так и по месту.

Предлагается уменьшить количество подводимого снизу под вагонетки охлаждающего воздуха с одновременным направлением его только в необходимые места – на колеса вагонеток.

Для конкретизации величины «запаса прочности» по температурному режиму работы подшипников и других элементов металлоконструкций вагонеток, выполнено частичное теплотехническое обследование их работы с мониторингом температуры элементов вагонеток на всей длине печи. При этом воспользовались инфракрасным пирометром излучения С-300.

Измеренные температуры колес вагонеток в контрольном канале не превышали величины 108°C (в 30-й позиции).

Таким образом, на основе анализа данных технологического энергоаудита туннельных печей для обжига керамических изделий выявлены места и причины непроизводительных теплотерь, обоснованы направления экономии энергоресурсов. Даны конкретные рекомендации по снижению теплотерь с уходящими газами и через ограждения печи.

**Ключевые слова:** обжиг кирпича, туннельная печь, технологический энергоаудит, теплотвери.

#### Список литературы

1. Жуков Д.В. Скоростная сушка кирпича-сырца. М.: Госстройиздат, 1959. 146 с.
2. Гинзбург Д.Б., Деликишкин С.Н., Ходоров Е.И., Чижеский А.Ф. Печи и сушилки силикатной промышленности / Под ред. Будникова П.П. М.: Госстройиздат, 1963. 344 с.
3. Баренбойм А.М., Галиева Т.М., Гинзбург Д.Б., Грессик А.М., Зимин В.Н., Кузяк В.А., Рутман Э.М., Ходоров Е.И., Чижеский А.Ф. Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности. М.: Стройиздат, 1964. 496 с.
4. Химическая технология керамики / Под ред. проф. И.Я. Гузмана. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. 496 с.
5. Кондратенко В.А. Керамические стеновые материалы: оптимизация их физико-технических свойств и технологических параметров производства. М.: Композит, 2005. – 512с.
6. Гнездов Е.Н., Марченко Ю.И., Гущина А.В., Кузьмина Е.Г., Медведева Н.В. Мониторинг температурного поля в сушилке керамических изделий // Строительные материалы. 2008. № 4. С. 39–41.
7. Гнездов Е.Н., Марченко Ю.И., Пережигин Е.А. Разработка и внедрение измерительно-регистрирующего комплекса для мониторинга процесса сушки керамических изделий. // Строительные материалы. 2007. № 2. С. 74–75.
8. Левченко П.В. Расчет печей и сушил силикатной промышленности. М.: Высшая школа, 1968. 368 с.